Die Bedeutung von Naturkonstanten für die Darstellung elektrischer Einheiten

Kose, Volkmar

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 27, 1977, S.245-256

Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Die Bedeutung von Naturkonstanten für die Darstellung elektrischer Einheiten

Von **Volkmar Kose**

Ein anerkanntes widerspruchfreies System physikalischer Einheiten ist die notwendige Grundlage für die Verständigung im Bereich von Forschung und Lehre sowie Wirtschaft und Technik. Blickt man zurück in die Zeit, in der Deutschland in zahllose Kleinstaaten aufgeteilt war, so herrschte auf dem Gebiete des Meßwesens ein heilloses Durcheinander. Selbst in kleinsten Regionen, benachbarten Städten und Marktplätzen, waren voneinander abweichende Maße in Gebrauch. Es existierten z. B. in deutschen Ländern über 30 verschiedene Längeneinheiten mit der gleichnamigen Bezeichnung Fuß. Durch verstärkten Austausch von Gütern und die Entstehung eines Welthandels wurden zuerst in Frankreich zur Zeit der französischen Revolution 1789 Bestrebungen deutlich, das Meßwesen zu vereinheitlichen. Diese Entwicklung sollte etwa 100 Jahre später 1875 zu einem zwischenstaatlichen metrologischen Vertragswerk, der Meterkonvention, führen, in der sich 17 Signatarstaaten bereitfanden, das „Metrische System" in ihren Ländern offiziell einzuführen und für ihre Vervollkommnung und Ausbreitung zu sorgen [1].

Neue naturwissenschaftliche Erkenntnisse und Fortschritte auf meßtechnischem Gebiet führten zur Kritik an den Grundlagen des Metrischen Systems. So stellte man die Unveränderlichkeit des Meters in Zweifel, das als vierzigmillionster Teil des durch Paris verlaufenden Erdmeridians festgelegt war, da unsere Erde nicht als starres, unveränderliches Sphäroid angesehen werden kann. Außerdem bestanden berechtigte Zweifel insbesondere an den Prototypen des Meters und der Masse im Hinblick auf das verwendete Material, seine Beständigkeit und seine Formgebung. J. C. Maxwell bot die Lösung in weiser Voraussicht an, als er 1870 schrieb [2]:

„Wenn wir also absolut unveränderliche Einheiten der Länge, Zeit und Masse schaffen wollen, so müssen wir diese nicht in den Abmessungen, in der Bewegung oder in der Masse unseres Planeten suchen, sondern in der Wellenlänge, Frequenz und Masse der unvergänglichen, unveränderlichen und vollkommen gleichartigen A t o m e." (Sperrung vom Autor)

Erst 100 Jahre später sollte sowohl das Meter als auch die Sekunde durch jeweils zwei konstante, vom Atombau bestimmte Quantenniveaus, definiert werden. Mit diesen Definitionen [3] traten an die Stelle einmalig vorhandener Prototypen Größen, die in der Natur im Aufbau gleicher Atome vielfach reproduziert erscheinen und sich nach unseren heutigen physikalischen Kenntnissen und Erfahrungen zeitlich nicht ändern. Die Definition der Masseneinheit verlief in dieser Hinsicht im Vergleich zu der des Meters und der Sekunde weniger spektakulär, da es bis heute noch nicht möglich ist, sie mit der notwendigen Genauigkeit auf Naturkonstante zurückzuführen.

Wie stand es um die elektrischen und magnetischen Einheiten?

Carl Friedrich Gauß gebührt das große Verdienst, als erster in seiner 1832 publizierten grundlegenden Arbeit mit dem Titel „Die Intensität der erdmagnetischen Kraft auf absolutes Maß zurückgeführt" auf dem Gebiet des Magnetismus Einheiten verwendet zu haben, die er aus den drei mechanischen Grundeinheiten für Länge (Millimeter), Masse (Milligramm) und Zeit (Sekunde) abgeleitet hatte. In der von Dorn [4] gegebenen deutschen Übersetzung des lateinischen Originaltextes heißt es auf S. 13:

„Diese Kraft ist nicht nur an verschiedenen Orten der Erde verschieden, sondern auch an demselben Orte veränderlich, sowohl im Laufe der Jahrhunderte und Jahre, als auch im Laufe der Jahreszeiten und der Tagesstunden. Hinsichtlich der Richtung ist zwar diese Veränderlichkeit lange bekannt gewesen; aber hinsichtlich der Intensität hat sie bis jetzt nur im Laufe der Stunden eines Tages beobachtet werden können, da wir keine Hülfsmittel hatten, die sich für längere Zeiträume eigneten. Diesem Mangel wird in Zukunft die Zurückführung der Intensität auf a b s o l u t e s M a a s s Abhülfe schaffen." (Sperrung vom Autor)

Auf S. 26 sagt Gauß explizit:

„Wenn wir für die Einheiten der Zeit, der Entfernung und der Masse die Secunde, das Millimeter und das Milligramm annehmen, . . .".

In einer weiteren Veröffentlichung aus dem gleichen Jahr wies Gauß darauf hin, daß es keine Schwierigkeiten machen würde, auch bei Messungen mit galvanischen Strömen ein „absolutes Maß" zu verwenden. Später hat Wilhelm Weber, Freund und Mitarbeiter von Gauß, diesen Gedanken verwirklicht, als er das absolute elektromagnetische Maßsystem aufstellte und damit die Gesetze der Elektrizität und des Magnetismus mit Hilfe der mechanischen Einheiten für Länge, Masse und Zeit formulierte. Im Laufe der folgenden Jahrzehnte kam man mit diesem „Dreiersystem" aus, bis es 1921 zweckmäßig schien, die Zuständigkeit der Meterkonvention auf elektrische Einheiten zu erweitern. 1960 schließlich folgte die offizielle Einführung des Internationalen Einheitensystems (Système International d'Unités oder abgekürzt SI), das als vierte Basiseinheit die Einheit der elektrischen Stromstärke, das Ampere, aufweist [5]. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß das SI noch drei weitere Basiseinheiten enthält, die jedoch keinen direkten Zusammenhang mit den Einheiten der Elektrodynamik haben. Es sind dies die Einheiten für die thermodynamische Temperatur (Kelvin), für die Stoffmenge (Mol) und für die Lichtstärke (Candela).

Definition der elektrischen Einheiten

Die im SI für die Elektrodynamik festgelegten Basiseinheiten sind die Sekunde (s), das Meter (m), das Kilogramm (kg) und das Ampere (A). Alle elektrischen und magnetischen Einheiten lassen sich in diesem System als Potenzprodukte dieser vier Basiseinheiten mit ganzzahligen Exponenten ausdrücken. So gilt z. B. für die Einheit der elektrischen Spannung $1\ V = 1\ s^{-3}m^{2}kgA^{-1}$.

Die Definitionen von Einheiten im SI basieren auf Idealzuständen und sind von ihren Realisierungen, d. h. Verwirklichungen oder Darstellungen im Laboratorium, zu unterscheiden. Prinzipiell lassen sich Einheiten nur mit einer nicht zu unterschreitenden Meßunsicherheit realiseren. Eine Ausnahme besteht lediglich bei der Einheit der Masse, bei der die Verkörperung durch einen einmaligen Prototyp selbst als Definition dient. Während bei Meter und Sekunde, die auf atomaren Konstanten basieren, die zeitliche Unveränderlichkeit gegeben ist, braucht dies beim Kilogramm nicht der Fall zu sein. So bedeuten Schwankungen der Masse des kg-Prototyps Schwankungen der Masseneinheit. Die drei mechanischen Basiseinheiten sind unabhängig voneinander; nur das Ampere ist wie eine abgeleitete Einheit durch folgende Definition [6] auf die Basisenheiten der Mechanik zurück geführt:

„Die Basiseinheit 1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete, gerade, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorrufen würde."

Diese Definition entspricht formal einem Vorschlag von Weber, der damit den Vorrang des Ampere unter den elektrischen Einheiten begründete. Das Bild 1 verdeutlicht die Verhältnisse und zeigt, daß mit der Definition des Ampere gleichzeitig die magnetische Feldkonstante μ_0 auf den Wert $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A² festgelegt ist.

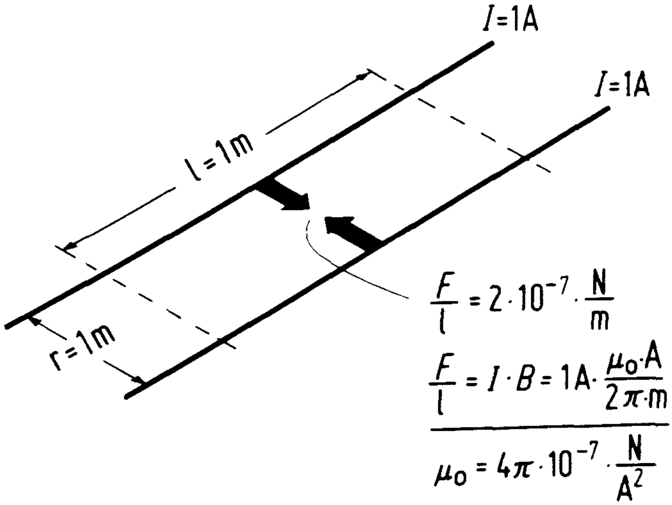

Bild 1
Definition des Ampere und Ableitung des Wertes von μ_0.
F elektrodynamische Kraft, l Leiterlänge, r Leiterabstand.

Alle abgeleiteten elektrischen Einheiten, wie z. B. das Volt und das Ohm, sind über die Gleichsetzung von mechanischer Leistung (Joule/Sekunde) und elektrischer Leistung (Watt) definiert. Das Bild 2 zeigt einige wichtige, durch das Gesetz über die Einheiten im Meßwesen [6] festgelegte, abgeleitete mechanische und elektrische Einheiten, die der Übersichtlichkeit wegen nicht alle als Potenzprodukte der Basiseinheiten, sondern mit ihren Einheitenzeichen angegeben sind.

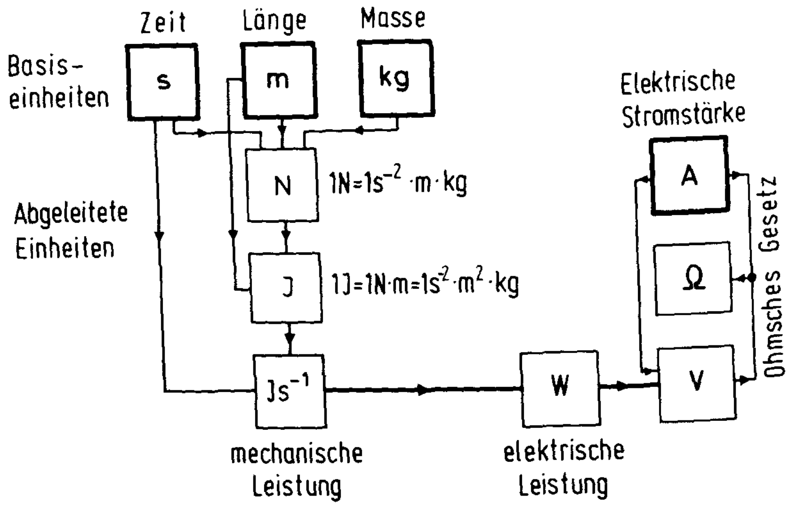

Bild 2
Definition von abgeleiteten SI-Einheiten der Elektrodynamik.

Darstellung der elektrischen Einheiten

Im folgenden sollen die heute verwendeten Verfahren zur Realisierung des Ohms und des Volts behandelt werden. Dabei bedient man sich solcher Verfahren, die die Einheiten unabhängig von Ort und Zeit mit höchster Reproduzierbarkeit und geringster Meßunsicherheit zu realisieren gestatten. Die Darstellungen des Ohms nach Thompson und Lampard bzw. des Volts auf der Grundlage des Wechselstrom-Josephson-Effektes erfolgen nicht, wie nach ihrer Definition, über die Gleichsetzung mechanischer und elektrischer Leistung, sondern unter Zuhilfenahme von Naturkonstanten und einer Längen- bzw. Frequenzmessung.

Thompson-Lampard-Verfahren

1957 veröffentlichte Lampard [7] ein neues Theorem der Elektrostatik mit einer verblüffend einfachen Aussage, die für die Darstellung des Ohms von wesentlicher Bedeutung ist. Unterbricht man an vier beliebig ausgewählten Stellen die elektrisch

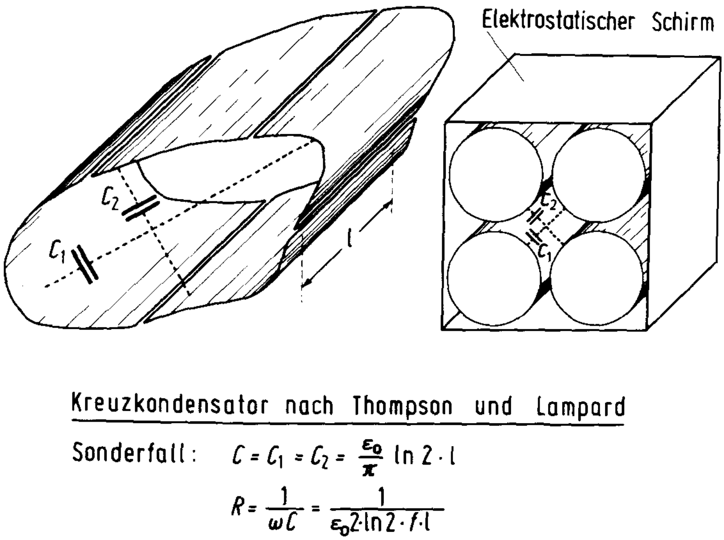

Bild 3

Darstellung des Farads und des Ohms nach dem Thompson-Lampard-Verfahren. C_1 und C_2 Kreuzkapazitäten, R Blindwiderstand, l Länge, f Frequenz.

leitende Mantelfläche eines unendlich langen Hohlprismas von beliebig geformtem Querschnitt, so bilden die jeweils gegenüberliegenden parallelen Teilmantelflächen zwei Kondensatoren (siehe Bild 3). Die Kapazitäten C_1 bzw. C_2 sind so festgelegt, daß die jeweils nicht beteiligten zwei Mantelflächen nach Art von geerdeten Schirmelektroden nichts zur wirksamen Kapazität beitragen. Eine solche Anordnung bildet einen „Kreuzkondensator" nach Thompson und Lampard mit den Kapazitäten pro Länge l des Hohlprismas von C_1/l bzw. C_2/l, für die im Vakuum folgende Beziehung gilt:

$$\exp(-C_1 \pi / \varepsilon_0 \cdot l) + \exp(-C_2 \pi / \varepsilon_0 \cdot l) = 1. \qquad (1)$$

Es bedeutet ε_0 die elektrische Feldkonstante. Für den Sonderfall, daß $C_1 = C_2 = C$ ist, ergibt sich aus Gl. (1) für die auf die Länge l bezogene Kapazität die Konstante

$$\frac{C}{l} = \frac{\varepsilon_0}{\pi} \cdot \ln 2 \qquad (2)$$

Näherungsweise ist dieser Wert 2 pF/m. In die Kapazität C, die unabhängig von jeglichen Querabmessungen ist, geht außer einer Längenmessung nur der aus μ_0 und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 errechenbare Wert

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \qquad (3)$$

ein. 1972 wurde die Lichtgeschwindigkeit mit einer relativen Meßunsicherheit von nur $4 \cdot 10^{-9}$ bestimmt [8], so daß nach Gl. (3) ε_0 mit einer relativen Unsicherheit von $8 \cdot 10^{-9}$ vorliegt. Da das Meter mit einer relativen Unsicherheit von nur $4 \cdot 10^{-9}$ realisiert werden kann [3], läßt sich nach Gl. (2) eine Fundamentalbestimmung des Farads bestenfalls auf 10^{-8} ausführen.

Darüber hinaus gestattet das Thompson-Lampard-Verfahren die Darstellung des Ohms, weil der oben diskutierte Kondensator an einer Wechselspannung einen Blindwiderstand darstellt, der durch die Kapazität und die Kreisfrequenz gegeben ist. Da Frequenzen zu den in der Physik am genauesten bestimmbaren Größen [3] zählen und mit relativen Unsicherheiten von nur einigen 10^{-13} gemessen werden können, läßt sich eine Fundamentalbestimmung des Ohms günstigenfalls auf 10^{-8} ausführen.

Die technische Verwirklichung eines Kreuzkondensators erfolgt aus fertigungstechnischen Gründen am besten mit vier kreiszylindrischen Elektroden, die in der in Bild 3 skizzierten Weise von einem elektrostatischen Schirm umfaßt sind. Die meßtechnischen Probleme, die durch ungleiche Kapazitäten ($C_1 \neq C_2$), unvermeidbare Spalte zwischen den stabförmigen Elektroden sowie durch inhomogene Randfelder an den Enden des Kreuzkondensators bedingt sind, konnten so weit gelöst werden, daß das Ohm mit einer relativen Meßunsicherheit von kleiner als 10^{-7} dargestellt werden kann [9].

Josephson-Effekte

1962 hat der damals 22jährige britische Student Brian D. Josephson einen jetzt nach ihm benannten quantenphysikalischen Effekt zwischen zwei schwach gekoppelten Supraleitern theoretisch vorhergesagt, der für die Bewahrung und künftig auch für die Darstellung des Volts von erheblicher Bedeutung ist [10]. Es gibt heute vielfältige Anwendungen des Gleichstrom- und des Wechselstrom-Josephson-Effektes, für die sein genialer Entdecker 1973 den Nobelpreis für Physik erhielt.

Gleichstrom-Josephson-Effekt

Zur Demonstration des Gleichstrom-Josephson-Effektes benötigt man ein sogenanntes Josephson-Element, das aus zwei schwach gekoppelten Supraleitern gebildet wird. Diese Kopplung kann auf verschiedene Weise geschehen. Bild 4 zeigt eine Ausführungsform eines Josephson-Tunnelelements, das aus zwei supraleitenden Metallfilmen besteht, die durch eine nur 2 nm dicke elektrisch nichtleitende Schicht getrennt sind [11]. Die Fläche des Josephson-Elementes ist ellipsenförmig und wird durch die beiden sich überlappenden supraleitenden Metallfilme gebildet. Prägt man in dieses Element einen Gleichstrom I mit wachsender Stärke ein und mißt die Gleichspannung U über den beiden Supraleitern, so erhält man die in Bild 4 dargestellte I-U-Kennlinie. Charakteristisch ist der bis zum kritischen Strom I_0 auftretende Supra-Gleichstrom (Gleichstrom-Josephson-Effekt), der durch Tunneln von Cooperpaaren (Elektronenpaaren) zwischen den sich auf engster Distanz — einigen

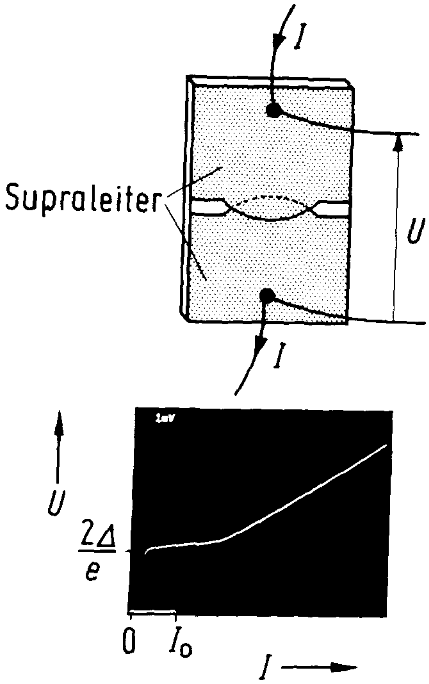

Bild 4
Gleichstrom-Gleichspannungskennlinie
zur Demonstration des Gleichstrom-Josephson-Effektes.
I_0 kritischer Suprastrom des Josephson-Elementes, 2 Δ Energielücke des Supraleiters (Blei bei einer Temperatur T = 4,2 K), e Elementarladung.

Atomlagen — befindlichen Supraleitern zustandekommt. Beim Überschreiten von I_0 tritt eine Spannung bei Ug ≈ 2 Δ / e von der Größenordnung Millivolt auf, die durch die Energielücke 2 Δ des Supraleiters und die Elementarladung e gegeben ist. Die I-U-Kennlinie für Spannungen U > 0 kommt durch Tunneln von Quasiteilchen (Einzel-Elektronen) zustande, die im Gegensatz zur Cooperpaar-Tunnelung auch beobachtet werden kann, wenn die elektrische Isolierschicht wesentlich größere Dicken als 2 nm aufweist.

Wechselstrom-Josephson-Effekt

Zur Demonstration des Wechselstrom-Josephson-Effektes wird das Josephson-Element in der in Bild 5 skizzierten Weise in einen Hohlleiter gebracht und einer Mikrowelle konstanter Frequenz f ausgesetzt. Man erhält einen völlig unerwarteten Zusammenhang zwischen Gleichstrom und Gleichspannung. Die infolge der Mikrowellenabsorption des Josephson-Elementes modifizierte I-U-Kennlinie

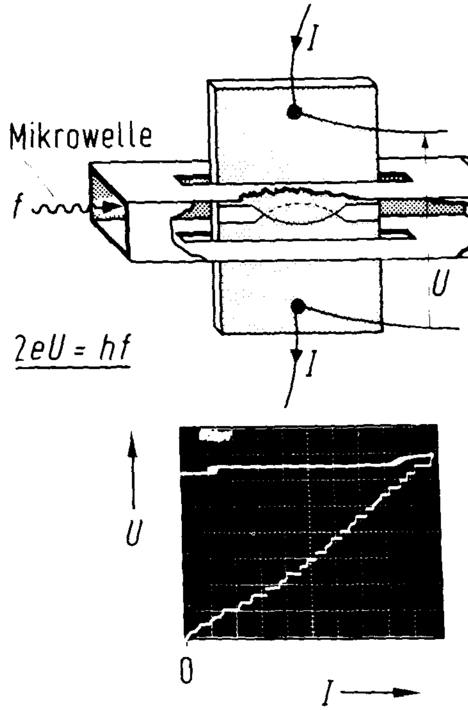

Bild 5
Gleichstrom-Gleichspannungskennlinie eines Josephson-Elementes bei Absorption einer Mikrowelle zur Demonstration des Wechselstrom-Josephson-Effektes. Gleichspannung $U \approx 3{,}2$ mV bei $f = 70$ GHz für die 22. Stufe konstanter Spannung, die außerdem in zehnfacher Dehnung abgebildet ist.

weist innerhalb kleiner Stromintervalle in äquidistanten Abständen charakteristische Stufen konstanter Gleichspannung auf. Josephson gab als Maß für den Abstand benachbarter Stufen konstanter Spannung U die Energiebeziehung

$$2eU = hf \tag{4}$$

an mit h als Planckschem Wirkungsquantum und e als Elementarladung. Die Gl. (4) stellt heute sowohl nach theoretischer Kenntnis als auch nach experimenteller Erfahrung eine universelle Beziehung zwischen Spannung U und Frequenz f dar. Diese Spannung-Frequenz-Relation zeigt sich unabhängig von der Art des Supraleiters, vom Typ des Josephson-Elementes und von seiner Umgebungstemperatur. Sie stellt damit eine sichere Basis dar, auf der durch Frequenzstabilisierung der Mikrowelle von relativ 10^{-10} stabilisierte Gleichspannungen mit gleicher geringer relativer Unsicherheit erzeugt werden können. Obgleich höchste Frequenzen (f = 70 GHz) und möglichst viele Stufen (etwa 20) verwendet werden, lassen sich pro Josephson-

Element experimentell nur Gleichspannungen von einigen Millivolt (3 mV) erzeugen. Auf der Grundlage dieser Referenzspannungen kann man Kryo-Spannungsnormale aufbauen, die Gleichspannungen von der Größenordnung 1 V innerhalb von $\pm 10^{-8}$ V langzeitig konstant halten können [12]. Darüber hinaus lassen sich Kryo-Stromnormale herstellen, von denen erwartet werden kann, daß ein Gleichstrom der Stromstärke von 1 A noch innerhalb $\pm 3 \cdot 10^{-10}$ A langzeitig stabil und auf besser als $\pm 10^{-8}$ A reproduziert bleibt [13]. Die Genauigkeit der nach diesen Verfahren erzeugten Ströme und Spannungen ist jedoch durch unsere ungenügende Kenntnis des Naturkonstanten-Quotienten h/e begrenzt, der mit einer relativen Unsicherheit von $6 \cdot 10^{-6}$ vorliegt.

Das Bild 6 gibt eine Übersicht über den Zusammenhang zwischen den diskutierten SI-Einheiten und Naturkonstanten [14], [15]. Die Zahlen geben bei den Naturkonstanten die Meßunsicherheiten an und bei den Einheiten die Unsicherheit ihrer Darstellung. Bei der Masseneinheit bedeutet die Zahlenangabe, daß ein Vergleich von zwei Massen von je einem Kilogramm mit dieser relativen Meßunsicherheit vorgenommen werden kann. Die punktiert gezeichneten Bereiche kennzeichnen die ungenauesten Größen. Die Zurückführung des Ampere auf die mechanischen Basiseinheiten mit Hilfe einer Stromwaage gelingt trotz größten experimentellen Aufwandes z. Z. nur mit einer Unsicherheit von $6 \cdot 10^{-6}$ A.

Ausgleichsrechnung von Naturkonstanten

Die elektrischen Einheiten könnten, wie auch aus der Übersicht von Bild 6 hervorgeht, wesentlich genauer realisiert werden, wenn h/e mit geringerer relativer

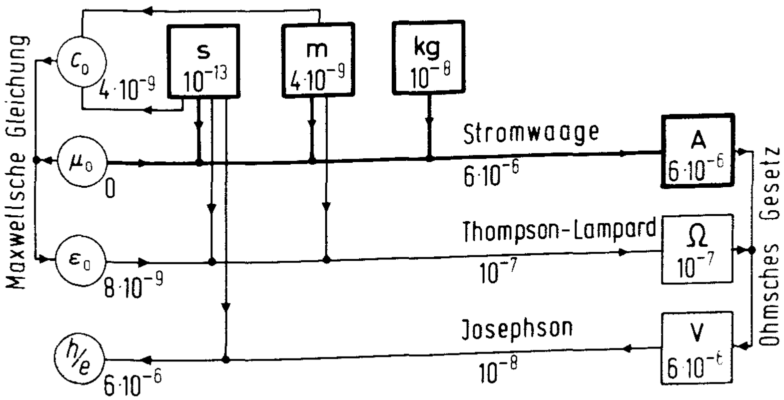

Bild 6

Zusammenhang zwischen Naturkonstanten und Einheiten im SI.
Die Zahlen bei den Naturkonstanten bedeuten relative Meßunsicherheiten und bei den Einheiten die Unsicherheit der zur Zeit besten Realisierung.

Unsicherheit als $6 \cdot 10^{-6}$ vorliegen würde. Dafür bieten sich zwei Lösungswege an. Durch Festlegung eines Zahlenwertes für h/e (d. h. Unsicherheit Null) könnten die im Bild 6 punktiert ausgewiesenen elektrischen Einheiten Volt bzw. Ampere mit den wesentlich geringeren relativen Unsicherheiten von 10^{-8} bzw. 10^{-7} dargestellt werden. Jedoch hat Schrader [3] darauf hingewiesen, daß wegen der Verknüpfung mechanischer und elektrischer Einheiten durch die Beziehung 1 Nm = 1 VAs das Kilogramm dann mit der jetzigen relativen Unsicherheit des Ampere von $6 \cdot 10^{-6}$ vorliegen würde und somit für das gesamte Einheitensystem keinen Vorteil bedeute.

Eine zweite Möglichkeit zur Erlangung eines genaueren h/e-Wertes besteht in der Ausnutzung gesetzmäßiger Zusammenhänge von h/e mit anderen Naturkonstanten.

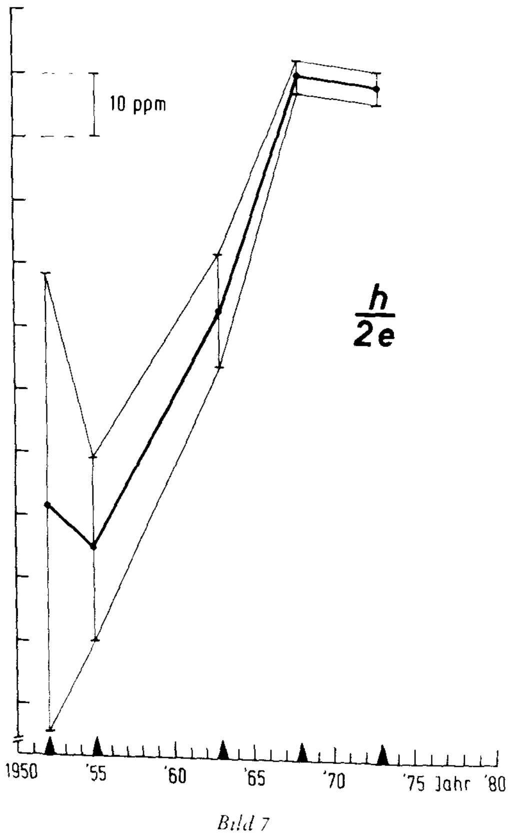

Bild 7

h/2e-Werte auf der Grundlage von fünf Ausgleichsrechnungen für Naturkonstante. h Plancksches Wirkungsquantum, e Elementarladung. Für die Ausgleichung im Jahr 1973 gilt

$$\frac{h}{2e} = 2{,}067\,850\,6 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{Wb}.$$

Bei diesem Verfahren [16] werden nur solche Naturkonstanten verwendet, die über existierende Theorien miteinander verknüpft sind. Die Gleichungen, die die verschiedenen Naturkonstanten verknüpfen, können auf Grund der diversen Experimente für eine Naturkonstante mehrere unterschiedliche Werte ergeben. Um nur einen Wert für eine Naturkonstante angeben zu können, wird mit Hilfe der Gaußschen Methode der kleinsten Quadrate für mehrere Variable ein bester Wert für jede Naturkonstante ermittelt, der alle Verknüpfungsbeziehungen nur minimal verletzt. Es wird verständlich, daß z. B. aufgedeckte systematische Fehler im Bereich des Experiments oder berichtigte Theorien zu Änderungen dieser „Bestwerte" führen können. In Bild 7 sind solche „Bestwerte" für h/2e auf Grund der Ausgleichsrechnungen [17] bis [21] dargestellt, die jeweils zu einem konsistenten Satz von „Bestwerten" für Naturkonstanten führten. Man erkennt, daß die relative Unsicherheit für h/2e im Jahr 1968 mit $3{,}3 \cdot 10^{-6}$ bereits kleiner ist als die in Bild 6 angegebene. Das gilt insbesondere auch für die jüngste im Jahr 1975 ausgeführte Ausgleichsrechnung, die eine relative Unsicherheit für h/2e von nur $6 \cdot 10^{-7}$ ermittelt hat [22]. Jedoch existieren z. Z. noch Inkonsistenzen [23], was diesen Satz von Naturkonstanten anbelangt. Es wird sich künftig zeigen, ob die z. Z. bestehenden Diskrepanzen durch neue Präzisionsmessungen beseitigt werden können. Offensichtlich führt jede Verringerung der Unsicherheit von h/2e durch das erwähnte Ausgleichsverfahren zusammen mit dem Josephson-Effekt zu einer entsprechend kleineren Unsicherheit des Volts. Hierin liegt die Bedeutung der Naturkonstanten für eine verbesserte Darstellung aller elektrischen Einheiten.

Schlußbetrachtung

Vor etwa 150 Jahren gelang C. F. Gauß die Rückführung aller magnetischen und elektrischen Größen auf die „absoluten Maße" der Mechanik, die damals in Form einmaliger makroskopischer Prototype vorlagen. Heute hingegen werden die elektrischen Einheiten mit Hilfe neuartiger Verfahren nach Thompson und Lampard sowie nach Josephson über Naturkonstante auf die Basiseinheiten zurückgeführt, die für Zeit und Länge bei jeweils gleichen Nukliden auf beliebig oft reproduzierbaren atomaren „Maßen" beruhen.

Literatur

[1] *J. Hoppe-Blank:* Vom Metrischen System zum Internationalen Einheitensystem — 100 Jahre Meterkonvention — PTB-Bericht (PTB—ATWD—5) August 1975.

[2] *J. C. Maxwell:* Die Naturforscher *4* (1871), S. 370.

[3] Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung PTB-Mitt. *85* (1975), S. 3—52.

[4] *C. F. Gauß:* Die Intensität der erdmagnetischen Kraft auf absolutes Maß zurückgeführt. Hrsg. von E. Dorn, Leipzig 1894 (= Ostwalds Klassiker der exakt. Wiss., Bd. 53).

[5] Das Internationale Einheitensystem. Vieweg-Verlag 1977.

[6] Gesetz über Einheiten im Meßwesen in der Fassung des Gesetzes zur Änderung des Gesetzes über Einheiten im Meßwesen vom 6. Juli 1973. PTB-Mitt. *83* (1973), S. 339 bis 341.
[7] *D. G. Lampard:* Proc. IEE (Monograph No. 216 M) vol. 104 C (1957), S. 271.
[8] *K. M. Evenson:* Phys. Rev. Lett. *29* (1972), S. 1346.
[9] *R. D. Cutkosky:* IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM—23, No. 4 (1974), S. 305.
[10] *B. D. Josephson:* Phys. Lett. *1* (1962), S. 251; Adv. in Phys. *14* (1965), S. 419.
[11] *J. Niemeyer:* PTB-Mitt. *84* (1974), S. 251.
[12] *V. Kose:* IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM—25, No. 4 (1976), S. 483.
[13] *V. Kose* und *B. Fuhrmann:* PTB-Mitt. *87* (1977), S. 208.
[14] *F. Melchert:* ATM *43* (1976), S. 137.
[15] *D. Kind:* ATM (1977), erscheint demnächst.
[16] *W. Wöger:* PTB-Mitt. *87* (1977), S. 113.
[17] *J. W. M. DuMond* and *E. R. Cohen:* Rev. Mod. Phys. *25* (1953), S. 691.
[18] *E. R. Cohen* et al.: Rev. Mod. Phys. *27* (1955), S. 363.
[19] *E. R. Cohen* and *J. W. M. DuMond:* Rev. Mod. Phys. *37* (1965), S. 537.
[20] *B. N Taylor, W. H. Parker* and *D. N. Langenberg:* A Reviews of Modern Physics, Monography (1969).
[21] *E. R. Cohen* and *B. N. Taylor:* J. Physical and Chemical Reference Data vol. 2, No. 4 (1973), pp. 663—734.
[22] *B. N. Taylor* and E. R. Cohen: Atomic Masses and Fundamental Constants 5, 1976, pp. 663, edited by J. H. Sanders and A. H. Wapstra.
[23] *B. N. Taylor:* Metrologia *12,* No. 2 (1976), S. 81.